

文章编号: 1001-8166(2003)03-0367-07

沙尘暴卫星遥感研究进展

范一大¹, 史培军¹, 罗敬宁²

(1. 北京师范大学资源科学研究所 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875;
2. 中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘 要 研究沙尘暴对我国北方地区的生态环境建设和可持续发展有着重要意义。近 10 年来, 我国北方地区的沙尘暴天气呈现增长的趋势, 相关学科都从不同侧面展开对沙尘暴的研究。主要综述了国内外利用卫星遥感技术研究沙尘暴的进展。对沙尘暴的国内外研究历史和现状进行了简要回顾, 然后系统地介绍了应用遥感技术开展沙尘暴研究的数据源及其特点、原理和技术方法, 其中, 对沙尘暴遥感研究的技术方法给予了更为详细的介绍, 最后针对现有研究的不足, 对未来沙尘暴遥感研究的方向进行了展望。

关 键 词 沙尘暴; 卫星遥感; 监测方法

中图分类号: P425.5⁵ TP70 文献标识码: A

0 引 言

沙尘暴是由特殊的地理环境和气象条件所致的一种较为常见的自然现象, 主要发生在沙漠及其临近的干旱与半干旱地区, 世界范围内沙尘暴多发区位于中亚、北美、中非和澳大利亚^[1]。我国西北及华北大部分地区属于中纬度干旱半干旱地区, 地表多为沙地、稀疏草地和旱作耕地, 特别在春季地表植被覆盖率低, 如果天气条件适宜, 容易形成沙尘暴天气。我国的北方地区属于中亚沙尘暴区的一部分, 属全球现代沙尘暴的频发地区之一。

沙尘暴过程对生态系统的破坏力极强, 它能够加速土地荒漠化, 对大气环境造成严重的污染, 使城市空气质量显著下降, 对人类健康、城市交通、通讯和供电产生负面影响。同时, 沙尘气溶胶对气候、海洋生态系统和生物化学循环也有着重要影响。

国外对沙尘暴的研究始于 20 世纪 20 年代, Hahnkin^[2]、Sutton^[3]和 Wolfson^[4]等分别对“Anzhi”型、

“Haboob”型和“Phantom”型沙尘暴的特征进行了分析研究, Brazel^[5]总结了美国亚利桑那州西南部 15 年产生沙尘暴的 4 类天气形式: 锋面型、雷暴、对流型、热带风暴型和高空切断低压型, McNaughton^[6]认为沙尘暴天气总是与中尺度低压或飢线相联系; Jauregui^[7]系统研究了墨西哥城沙尘暴的时空分布; Littmann^[8]分析了亚洲沙尘暴的发生频率; Goudie^[9]总结了沙尘天气导致的一系列环境结果和灾害。Tegen^[10]在全球模式中模拟了撒哈拉地区沙尘的起源、传输和分布, Jemastu^[11]模拟了亚洲沙尘的跨太平洋传输, Bergam^[12]的研究表明, 在全球范围内, 沙尘暴主要的源地在北非的撒哈拉沙漠和中亚的戈壁, Soddoway^[13]研究了地表植被覆盖对土壤风力侵蚀的影响, Gillette^[14]通过野外风洞试验和观测得出了沙尘粒子起动的摩擦速度与下垫面土壤的特性有着很大关系的结论。此外, Nilgun^[15]还分析了沙尘气溶胶的成分和含量。

我国从 70 年代开始对沙尘暴天气开展较为系

收稿日期: 2002-07-26 修回日期: 2002-10-07

* 基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目“我国生存环境演变和北方干旱化趋势预测研究”(编号: G1999043406)和“中国北方沙漠化过程及其防治研究”(编号: G2000048701)资助。

作者简介: 范一大(1968-) 男, 内蒙古呼和浩特人, 博士研究生, 主要从事资源与环境信息管理和自然灾害遥感监测研究。

E-mail: yd@rs.bnu.edu.cn

统的研究。王式功^[16]和全林生^[17]等研究了我国沙尘暴天气的时空分布特征、形成原因和发展趋势,胡隐樵等^[18]研究了沙尘暴形成的动力条件,纪飞等^[19]从数值模拟和数值预报的角度,模拟了沙尘暴发生、发展的机制和演变结构;史培军^[20,21]、叶笃正^[22]、高尚玉^[23]、朱震达^[24]、胡金明^[25]和范一大^[26]等分析了我国北方地区沙尘暴源区的分布规律和成因,指出沙尘暴的形成和强度变化与之有着必然的联系,同时指出沙尘暴的发生、发展是下垫面地形地貌、水文、土壤、植被等多种环境要素相互作用、长期发展的结果,并给出了相应对策。我国学者围绕沙尘暴问题还展开了更为广泛的研究,限于文章篇幅,这里不再详述。

沙尘暴的监测方法中,传统的地面监测方法受到许多因素的制约,不能很好地刻画沙尘暴过程。利用遥感技术从空间对沙尘暴进行监测是目前最为有效的手段。随着遥感技术的不断发展,它在沙尘暴研究中发挥越来越重要的作用。利用多种遥感数据监测沙尘暴,提取沙尘暴信息,定量分析沙尘暴的有关参数,已成为沙尘暴研究的热点课题。本文对这方面的研究现状进行了比较系统的分析,指出了目前存在的问题,对沙尘暴卫星遥感的发展提出了建议。

1 沙尘暴卫星遥感数据源及特点分析

自 1960 年美国第一颗气象卫星上天以来,遥感对地观测技术取得了很大的发展。基于不同遥感平台的遥感数据应用理论和方法都积累了丰富的研究成果。目前气象卫星数据是沙尘暴遥感监测主要数据源,包括 NOAA / AVHRR、TERRA / MODIS、GMS / VISSR 数据和 FY-1C / M-VISR 数据,空间分辨率为 0.25 ~ 5 km,光谱范围覆盖可见光、近红外和红外,其中 MODIS 数据的光谱分辨率有了显著的提高,通道数增加到了 36 个。

由于 4 种卫星数据都实行全球免费接收的政策,数据获取比较廉价,同时它们的时间、空间分辨率和光谱分辨率不同,结合使用可以互相取长补短达到满意的效果,因此,已经越来越广泛地应用于包括沙尘暴灾害在内的各种自然灾害的研究中。

地球同步气象卫星 GMS / VISSR 数据虽然空间分辨率低(1.25 ~ 5 km),但可以每小时对 1/3 的地球表面进行重复探测,是目前最宏观的最具时效性的地球同步观测数据之一,非常适合于沙尘暴的实时发现和监测。极轨气象卫星 NOAA / AVHRR、FY-1C / M-VISR 和 TERRA / MODIS 数据,空间分辨率

(0.25 ~ 1.1 km)高于静止气象卫星,扫描宽度 2 300 ~ 2 800 km,如时机恰当则可较好的用于提取沙尘暴信息。但是,由于极轨气象卫星的时间分辨率(最大能达 6 小时)相对较低,对于持续时间较短的沙尘暴过程往往容易漏失监测的有效时机^[27]。自从 1999 年 12 月 18 日美国成功发射 TERRA 卫星后,其星载 MODIS 传感器在继承了 NOAA / AVHRR 功能的同时,在数据分辨率、数据波段数、数据应用范围、数据的发射与接收、数据的格式上都作了很大的改进^[28],注定将成为 NOAA 卫星的换代产品,也将成为沙尘暴遥感监测和研究的主要信息源。

2 沙尘暴卫星遥感原理

沙尘中含有大量的矿物质(沙尘气溶胶),它通过吸收和散射太阳辐射及地面和云层长波辐射来影响地球辐射收支和能量平衡^[12,29],同时影响着大气的浑浊度(能见度),在 AVHRR 的各通道上表现出了光谱特征的差异。由于沙尘的光谱特性与下垫面背景是有区别的,这为沙尘暴的监测提供了可能。郑新江等^[30]指出,沙尘粒子的辐射特性主要体现在沙尘粒子的粒径大小、形状、质地上。随着沙尘性天气强度的不同,沙尘的粒径差异也较大,从浮尘天气到沙尘暴,其沙粒半径可以从 0.01 到 100 μm 以上,其中造成影响的沙尘暴天气中 5 μm 以上半径的沙尘粒子占绝大多数。粒子半径越大,散射能量越集中在前向方向,吸收消光也同时增加,散射比下降。即当天空中大粒子沙尘增多时,光线被强烈吸收,能见度急剧下降。根据不同光谱波段上沙尘粒子的散射和辐射特性,可以有效地将沙尘层、云、地面等遥感目标和干扰因素加以区分。方宗义等^[31]也做了类似的研究,认为沙尘粒子对太阳短波辐射的作用介于瑞利散射(大气分子)和 Mie 散射(云滴等)之间。在卫星遥感探测器上感应到的沙尘区的反射率也介于晴空(瑞利散射)和云之间。同时认为悬浮在空中的沙尘粒子的发射特性不但与粒子的构成(直径大小和分布)有关,也与粒子的浓度有关。

在遥感数据中,可见光和近红外通道可用来测算下垫面的反射率,对地表植被、云和水体较为敏感。Thomas 等^[32]指出,在 NOAA / AVHRR 数据的可见光通道,大气沙尘对它的影响往往要高于对近红外通道的影响,尤其在植被盖度较高时更为明显。热红外通道可以用来测算下垫面的亮度温度。由于沙尘与云系、地表在反射率和温度上均有差异,利用这些特征可以从遥感数据中将沙尘暴信息分离

出来。郑新江^[33]、范一大等利用 NOAA / AVHRR 数据分析了下垫面、云和沙尘区的光谱特征,从给出的直方图上,可以清楚地反映出三者 in 光谱特征上的明显差异,在 1~4 通道的反射率(或亮温)特征中,下垫面数值分别集中在 17%、18%、302K 和 290K 处,沙尘区数值分别在 28%、25%、296 K 和 265K 处,云区数值分别集中在 50%、45%、275K 和 230 K 处。关于沙尘暴的大气含沙量研究,孙司衡^[27]认为依据遥感结构方程和大气辐射传输理论基础,模拟计算沙尘性高浑浊度大气或沙尘暴的发射率,参考红外数据和有关因子,可以解析沙尘气溶胶光学厚度,进而得出沙尘天气过程或沙尘暴的大气含沙量。

3 沙尘暴卫星遥感监测的技术方法

3.1 利用单通道数据的监测方法

国外对沙尘暴的遥感监测方法进行了大量研究,基本上都是使用气象卫星数据。主要受计算机处理设备能力和卫星数据本身的制约,20 世纪 90 年代以前的沙尘暴研究工作仅局限于单通道信息的处理和分析。

如 20 世纪 70 年代 Carlson^[34]利用卫星观测的亮度资料确定撒哈拉地区沙尘的爆发及其相应的大气扰动;Shenk 等^[35]利用可见光或红外通道数据研究了水面和路面上空沙尘暴的监测方法;Griggs^[36]利用 ERTS-1 的可见光数据研究了水面上空大气悬浮颗粒光学厚度的测量方法;Norton 等^[37]利用静止气象卫星可见光数据监测海洋上空沙尘的爆发,同时也估算了其光学厚度。

徐希慧^[18]利用可见光数据对塔里木盆地沙尘暴卫星云图特征进行了系统的研究,研究表明,在可见光卫星云图上,陆地表面有水体、雨迹、森林覆盖的地方反照率最小,所以呈黑色;有植被覆盖的地区为深灰色或灰色;在干燥地区的沙漠由于植被稀少反照率较大,呈现灰色或淡灰色;云系和高山积雪反照率最大,为灰色或白色;浮尘、扬沙、沙尘暴所形成的“沙尘羽”和低压相似呈灰白色。杨东贞^[33]也对北京地区沙尘暴的案例进行了分析,发现在可见光卫星云图上沙尘暴呈现浅灰色。

但总的来说,由于在同一通道上,沙尘暴、地表和云的探测数值比较接近,使用单一通道数据判识这些信息有很大的局限性。

3.2 多通道数据组合的监测方法

随着卫星探测器性能的不断改进,卫星光谱分

辨率提高,通道数增加,加之计算机处理能力的提高,使得图像处理和模式识别等理论和技术都有了较大的突破,为利用多通道遥感数据进行沙尘暴的研究创造了有利条件,事实上也取得了满意的效果。

郑新江等^[33]介绍了利用气象卫星多通道组合信息资料相结合监测沙尘暴的一种方法。他们根据光谱波长对沙尘暴的反应特征,建立了 0.63 μm 和 1.06 μm 波长反射率与 3.75 μm 和 11.0 μm 波长亮温的统计关系。其中以 1.06 μm 波长的关系更好一些,形式如 $R_{1.06} = f(T_{3.75}, T_{11}) = a(T_{3.75}/T_{11}) + b$,二者有显著的线性关系(0.001 水平)。利用 $f(T_{3.75}, T_{11})$ 也可以将高、低云、地面与沙尘暴很清楚的加以甄别,同时发现地面因素在沙尘暴监测识别中的干扰作用是不容忽视的。如果从遥感探测到的反射率中剔除地面反射部分,就可以得出沙尘层的反射率,可用于相应的沙尘暴遥感定量参数的确定。通过与地面气象观测资料进行对比分析,证明了这种方法的可行性。利用此方法对 2000 年 3~4 月北方沙尘暴过程进行了监测,取得了较好的效果。

方宗义等^[31]根据沙尘和大粒子气溶胶的散射和发射特性,利用气象卫星上的可见光、短波红外和红外窗区的辐射测量值对沙尘暴的监测进行了研究。认为在 3.7 μm 的卫星遥感辐射测量值中,既有沙尘粒子以本身温度发射的辐射部分,也有沙尘粒子对太阳辐射在这个波段范围内的后向散射部分。因此采用了 NOAA / AVHRR 通道 3 和通道 4 的差值来判识沙尘暴区,在实际应用中沙尘暴区域得到了增强,并突出了沙尘信息的纹理结构。他们的进一步研究结果表明,如果把差值辐射亮温图与红外通道联合使用,可以解决差值辐射亮温图难以将沙尘区与云区有效区别开的问题。

范一大等^[12]利用 NOAA / AVHRR 数据研究了沙尘暴图像的查找表(Lookup Table)增强法和沙尘暴信息提取的经验模型。查找表法综合考虑了遥感图像中所含的特征信息,建立了原始遥感合成图像各通道数值与显示遥感图像各通道亮度值之间的映射关系,可以大大提高沙尘暴遥感图像信息增强的时效,有利于在应急决策系统中使用。沙尘信息提取技术是从定性到定量研究沙尘暴过程的关键技术。他们提出了沙尘暴信息分层提取的策略,建立了沙尘暴信息的提取模型,在此基础上提出了根据

远红外波段的辐射亮温对沙尘信息进行密度分割的方法,也达到了满意的效果。研究中发现,在沙尘暴监测中,云是主要的干扰因素。

使用多通道组合信息监测沙尘暴, NOAA / AVHRR 数据常选用第 1、2、4 通道或第 1、2、3 通道^[38, 40], FY-1C / MIVIS 数据主要选用第 1、2、7 通道^[41, 42], GMS 数据主要选用第 1、3 或 4 通道^[31]。TERRA / MODIS 数据多达 36 个通道,除了可选用可见光第 1 通道(0.62 ~ 0.67 μm)和近红外第 2 通道(0.841 ~ 0.876 μm)外,其它通道如何选择才是最佳的,有必要进一步研究。

3.3 对沙尘暴过程的监测研究

叶笃正^[22]、孙司衡^[27]、方宗义^[33]、吴晓京^[43]等通过应用卫星遥感监测信息对 2000—2001 年的沙尘暴过程进行了研究,结合 GIS 技术确定了沙尘暴的起源、空间分布、移动路径和降尘区域,分析了沙尘暴遥感图像的特征,讨论了我国北方地区沙尘暴源地的分布。

江吉喜等^[44, 45]运用 1 小时间隔的 GMS-4 数字展宽红外资料和部分常规资料,分析了 1993 年 5 月 5 日发生在我国西北地区的特大沙尘暴的形成原因。结果指出,通过遥感手段可以分析出特强沙尘暴过程中强冷锋前部的中尺度对流系统(MCS)及其伴随的飚线的卫星云图特征。由于静止气象卫星资料的时空分辨率高,同时可以监测到从行星尺度到天气尺度、中尺度以及风暴对流单体等各种不同时空尺度的天气系统,可以提高对沙尘暴天气系统发生、发展机理及其结构特征的认识,增强预报能力。在结合数值产品物理量场分析的基础上概括出了 3 种(锋前飚线、锋尾强对流云团、锋前强对流云团)引起强沙尘暴天气发生的概略模型图,并描述了系统演变过程中云系特征的变化和相应物理量特征。

高庆先等^[46]的研究也证明,通过分析多时次的遥感数据,可以动态监测到沙尘暴的起源、扩散及沉降过程。利用 GMS 卫星逐日、逐时的遥感监测数据,结合地面气象站观测、天气图分析和中尺度数值模拟等资料,可以对沙尘暴形成全过程的机制有进一步的了解。

3.4 关于沙尘暴的光学厚度反演

沙尘暴光学厚度是定量研究沙尘暴的重要参数,通过它可以计算扬尘或沙尘暴天气过程的大气含沙量。由于陆面反射要比海面反射复杂的多,目前已有的沙尘气溶胶光学厚度反演方法都是在海面上空进行的。

Fraser^[47]的研究表明,利用 NOAA / AVHRR 数据的可见光和近红外通道反演沙尘暴光学厚度是可行的。赵风生等^[48]也利用 NOAA / AVHRR 的可见光和近红外通道数据,采用 Junge 谱来近似实际大气中的气溶胶谱分布,提出了利用遥感数据反演气溶胶光学厚度和 Junge 谱指数的迭代方案,并反演了海洋上空气溶胶的光学厚度。数值试验结果表明,该方案可以有效地减小气溶胶谱分布的不确定性引起的反演误差,使误差小于 10%,这对沙尘暴光学厚度的反演有借鉴意义。毛节泰等^[49]利用 GMS5 可见光通道数据对反演湖面上空气溶胶光学厚度进行了可行性分析,结果表明,反演所得 0.5336 μm 气溶胶光学厚度强烈依赖于湖面反射率的选取,通过选取合适的湖面反射率,卫星反演的气溶胶光学厚度和地面光度计遥感的月均值相对误差不超过 30%。邱金恒等^[50]采用激光雷达和光度计对沙尘暴过程进行综合测定的结果表明,沙尘暴出现后的气溶胶光学厚度均值是出现前的 20 倍以上。

3.5 关于下垫面对沙尘暴形成、演化的贡献研究

沙尘暴的形成、加强以及时空分布,受到很多因素的影响,其中下垫面因素是主要因素之一。近年来趋向于通过遥感技术反演沙尘暴途经区域下垫面的有关参数,分析其与沙尘天气形成和演化间的关系。

许多人^[26, 51-53]进行了这方面的研究,主要借助于 IM 和 NOAA / AVHRR 数据,对下垫面的一些参数进行了提取或反演,这些参数主要包括:土地利用/覆盖、植被指数、植被覆盖度、土壤含水量等,同时结合 GIS 的土壤质地和 DEM 等数据,对沙尘暴形成、发展和沉降的下垫面贡献给予了较为系统的分析,同时分析了我国北方沙尘暴源区的空间分布。结果证明,下垫面状况是沙尘天气产生与发展的关键因素。认为对下垫面状况进行长期的综合性动态监测与分析,不仅有助于分析沙尘天气发生的条件,而且有利于制定合理的防治规划,从根本上避免或减轻沙尘天气的影响。

4 研究展望

(1) 利用多种遥感数据监测沙尘暴是今后沙尘暴研究的主要方向。当前已经针对不同平台的卫星数据发展出来了许多沙尘暴监测方法,对这些方法的优化和完善是今后一段时间沙尘暴监测研究的主要任务,其中建立定量的沙尘暴信息提取遥感模型尤为重要。

(2) 目前,沙尘暴光学厚度、含沙量和强度等的

定量计算离实际需要相差甚远,但从方法上已经有了一些积累。主要的制约因素是缺乏地面实际测量数据以及下垫面条件的复杂多样,应该从这方面进行有针对性的研究和试验。

(3) 沙尘暴过程与下垫面状况之间关系的研究需要进一步深入,目前还没有建立起二者间的定量关系模型,还停留在定性的描述阶段。应该利用遥感技术,提取沙尘暴途经区域下垫面的各种参数(土地利用,土壤含水量,植被组成、结构、覆盖度等)在GIS的支持下,建立我国北方戈壁、沙漠、沙漠化土地和潜在沙漠化土地的空间数据库,结合与沙尘暴形成有关的气象要素(温度、降水、风等)和地形条件,建立模型,定量分析有关下垫面因子与沙尘暴强度变化间的关系。

参考文献(References):

- [1] Pye K. *Aolian Dust and Dust Deposits*[M]. London: Academic Press Inc Ltd, 1987. 113-126.
- [2] Harkin E H. On dust raising winds and descending currents[J]. *India Meteorological Memoirs*, 1921, 22: 210-223.
- [3] Sutton L J, Haboobe [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1925, 51: 25-30.
- [4] Wilson N, Mason M. Satellite observations of a phantom in the desert[J]. *Weather*, 1986, 41(2): 57-60.
- [5] Brasel A J, Nicking W C. The relationship of weather types to dust storm generation in Arizona[J]. *Journal of Climatology*, 1986, 5(3): 255-275.
- [6] Menaugh D L. Possible connection between anomalous arid cyclones and sandstorms[J]. *Weather*, 1987, 42(1): 8-13.
- [7] Auregui E. The dust storms of Mexico City[J]. *International Journal of Climatology*, 1989, 9(2): 169-180.
- [8] Litmann T. Dust storm frequency in Asia: Climatic control and variability[J]. *International Journal of Climatology*, 1991, 11: 393-412.
- [9] Goude A S, Middleton N J. The changing frequency of dust storms through time[J]. *Climatic Change*, 1992, 20: 197-225.
- [10] Tegen I, Fung I. Modeling of mineral dust in the atmosphere: Source, transport, and optical thickness[J]. *Geophysical Research*, 1994, 99(22): 497-914.
- [11] Uemitsu M, Duce P, Prospero J, et al. Transport of mineral aerosol from Asia over north Pacific ocean[J]. *Geophysical Research*, 1993, 98(c9): 5 343-5 352.
- [12] Bergametti G. *Encyclopedia of Earth System Science*[M]. San Diego: Academic Press, 1992. 171-192.
- [13] Soddaway F H, Chepil W S, Ambrust D V. Effect of kind, amount, and placement of residue on wind erosion control[J]. *Transactions of the ASAE*, 1965, 8(3): 327-331.
- [14] Gillette D A, Adams J, Endo A, et al. Threshold velocities for input of soil particles in the arid desert soils[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1980, 85(c15): 5 621-5 630.
- [15] Nilgun Kublay, Sobodan Nickovic, Francois Duise, et al. An illustration of the transport and deposition of mineral dust onto the eastern Mediterranean[J]. *Atmospheric Environment* 2000, 34: 1 293-1 303.
- [16] Wang Shigong, Dong Guangrong, Yang Debao, et al. A study on sandstorm over the desert region in north China[J]. *Journal of Natural Disasters*, 1996, 5(2): 31-37. [王武功, 董光荣, 杨德保, 等. 中国北方地区沙尘暴变化趋势初探[J]. *自然灾害学报* 1996, 5(2): 31-37.]
- [17] Qian Lisheng, Shi Shaoying, Zhu Yafen, et al. Temporal-spatial distribution characteristics and causes of dust-day in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(4): 477-485. [钱林生, 时少英, 朱亚芬, 等. 中国沙尘天气变化的时空特征及其气候原因[J]. *地理学报*, 2001, 56(4): 477-485.]
- [18] Hu Yingqiao, Y Mishua. Micrometeorological characteristics and local triggering mechanism of strong dust storm[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1997, 5: 581-589. [胡应樵, 光田宁. 强沙尘暴微气象特征和局地触发机制[J]. *大气科学*, 1997, 5: 581-589.]
- [19] Ji Fei, Qin Yu. The numerical simulation on dust storm over East Asia: a case analysis[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1998, 34(5): 639-645. [纪飞, 秦瑜. 东亚沙尘暴数值模拟: 一个案例分析[J]. *北京大学学报(自然科学版)* 1998, 34(5): 639-645.]
- [20] Shi Peijun, Yan Ping, Yuan Yi. The driving force analysis of the blown-sand activity in northern China[J]. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(1): 41-47. [史培军, 严平, 袁艺. 中国北方风沙活动的驱动力分析[J]. *第四纪研究* 2001, 21(1): 41-47.]
- [21] Shi Peijun, Zhang Hong, Wang Ping, et al. The regional patterns for combating sandification in sandy disaster affected area in China[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2000, 9(3): 1-7. [史培军, 张宏, 王平, 等. 我国沙区防沙治沙的区域模式[J]. *自然灾害学报* 2000, 9(3): 1-7.]
- [22] Ye Duzheng, Chou Jifan, Liu Jiyuan, et al. Causes of sandstormy weather in northern China and control measures[J]. *Acta Geographica Sinica* 2000, 55(5): 513-521. [叶笃正, 丑纪范, 刘纪远, 等. 关于我国华北沙尘暴天气的成因与治理对策[J]. *地理学报* 2000, 55(5): 513-521.]
- [23] Gao Shangyu, Shi Peijun, Ha Si, et al. Causes of rapid expansion of blown-sand disaster and long-term trend of desertification in northern China[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2000, 9(3): 31-37. [高尚玉, 史培军, 哈斯, 等. 我国北方风沙灾害加剧的成因及其发展趋势[J]. *自然灾害学报* 2000, 9(3): 31-37.]
- [24] Zhu Zhenda, Chen Guangting. *Sandy Desertification in China* [M]. Beijing: Science Press, 1994. [朱震达, 陈广庭. *中国土地沙漠荒漠化* [M]. 北京: 科学出版社, 1994.]
- [25] Hu Jinning, Cui Hailing, Tang Zhiyao. Temporal and spatial characteristics of sandstorm in China and the influences of human activities on its development trend[J]. *Journal of Natural Disasters*, 1999, 8(4): 49-56. [胡金明, 崔海亭, 唐志尧. 中国沙尘暴时空特征及人类活动对其发展趋势的影响[J]. *自然灾害*

学报 1999 3(4): 49-56.]

- [26] Fan Yida, Shi Peijun, Wang Xiushan, et al. The analysis of typical dust storm in northern China by remote sensing[J]. *Advances in Earth Sciences*, 2002 17(2): 289-294. [范一达, 史培军, 王秀山. 中国北方典型沙尘暴的遥感分析[J]. *地球科学进展* 2002 17(2): 289-294.]
- [27] Sun Siheng, Zheng Xinjiang. Sandstorm monitoring by satellite remote sensing and service for reducing disaster losses[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2000 25(2): 33-36. [孙司衡, 郑新江. 沙尘暴的卫星遥感监测与减灾服务[J]. *测绘科学* 2000 25(2): 33-36.]
- [28] Liu Yujie, Yang Zhongdong. The Theory and Method of Disposal about MODIS Remote Sensing Information[M]. Beijing: Science Press 2001. [刘玉洁, 杨忠东. MODIS 遥感信息处理原理与算法[M]. 北京: 科学出版社, 2001.]
- [29] Liu H., Sun D. Pathway of dust input to the Chinese Loess plateau during the last glacial and interglacial periods[J]. *China* 2000, 40: 251-261.
- [30] Zheng Xinjiang, Lu Wenjie, Luo Jingning. Research on the dust storm monitoring using multi-channel meteorological satellite data[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2001 5(4): 300-305. [郑新江, 陆文杰, 罗敬宁. 气象卫星多通道信息监测沙尘暴的研究[J]. *遥感学报* 2001 5(4): 300-305.]
- [31] Fang Zongyi, Zhang Yungang, Zheng Xinjiang, et al. The method for monitoring dust deviling using satellite and preliminary results[J]. *Quaternary Sciences*, 2001 21(1): 48-55. [方宗义, 张运刚, 郑新江, 等. 用气象卫星遥感监测沙尘暴的方法和初步结果[J]. *第四纪研究* 2001 21(1): 48-55.]
- [32] Thomas Petke, Alex N., Halliday, et al. Dust production and deposition in Asia and the north Pacific Ocean over the past 12 Ma[J]. *Earth and Planetary Science Letters* 2000 178: 397-413.
- [33] Zheng Xinjiang, Liu Cheng, Lu Wenjie, et al. Research the method on dust storm monitoring[A]. In: Fang Zongyi, ed. *Studies on Sand-dust Storms in China*[C]. Beijing: Meteorology Press, 1997. 82-87. [郑新江, 刘诚, 陆文杰, 等. 沙尘暴监测方法研究[A]. 见: 方宗义编. *中国沙尘暴研究*[C]. 北京: 气象出版社, 1997. 82-87.]
- [34] Carion T N. Atmospheric turbidities in Saharan dust outbreaks as determined by analysis of satellite brightness data[J]. *Monthly Weather Review*, 1979 107: 322-335.
- [35] Shenk W E, Curran R J. The detection of dust storms over land and water with satellite visible and infrared measurements[J]. *Monthly Weather Review*, 1974 102: 80-87.
- [36] Griggs M. Measurements of atmospheric aerosol optical thickness over water using ERTS-1 data[J]. *Air Pollution Control Association*, 1975 25: 622-625.
- [37] Norton C, Mosher FR, Hiron B, et al. A model for calculating desert aerosol turbidity over the oceans from geostationary satellite data[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1980 19: 633-644.
- [38] Xu Xihui. Analysis and study on cloudness feature of sandstorms over Tarim basin[A]. In: Fang Zongyi, ed. *Studies on Sand-dust Storms in China*[C]. Beijing: Meteorology Press, 1997. 88-91. [徐希慧. 塔里木盆地沙尘暴的卫星云图分析与研究[A]. 见: 方宗义编. *中国沙尘暴研究*[C]. 北京: 气象出版社, 1997. 88-91.]
- [39] Yang Dongzhen. A case study on sand storms[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1991 5(2): 150-155.
- [40] Fan Yida, Shi Peijun, Fan Yaosheng, et al. Monitoring the intensity of regional dust storm using NOAA/AVHRR data[J]. *Journal of Natural disasters* 2001 10(4): 46-51. [范一达, 史培军, 潘耀忠, 等. 基于 NOAA/AVHRR 数据的区域沙尘暴强度监测[J]. *自然灾害学报* 2001 10(4): 46-51.]
- [41] Zheng Xinjiang, Xu Jianfen, Luo Jingning, et al. Study of using FY-1C meteorological satellite to monitor the dust devil in south Xinjiang[J]. *Journal of Desert Research*, 2000 20(3): 286-288. [郑新江, 徐建芬, 罗敬宁, 等. 利用风云-1C 气象卫星监测新疆沙尘暴研究[J]. *中国沙漠* 2000 20(3): 286-288.]
- [42] Zheng Xinjiang, Luo Jingning, Liu Zheng. Study of using FY-1C meteorological satellite to monitor the dust storm[J]. *Aerospace Shanghai*, 2001 1: 55-60. [郑新江, 罗敬宁, 刘征. FY-1C 气象卫星在沙尘暴监测中的应用[J]. *上海航天* 2001 1: 55-60.]
- [43] Wu Xiaojing, Lu Jianfen, Zhang Xiaohu, et al. Synoptic analysis on the sand dust storm in spring, 2001[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2001 3: 8-10. [吴晓京, 陆均天, 张晓虎, 等. 2001 年春季沙尘天气分析[J]. *国土资源遥感* 2001, 3: 8-10.]
- [44] Jiang Jixi. A study of formation for "black storm" using GMS-4 imagery[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1995 3(2): 177-184. [江吉喜. 一次特大沙尘暴成因的卫星云图分析[J]. *应用气象学报* 1995 3(2): 177-184.]
- [45] Jiang Jixi, Xiang Xiangang, Wang Zhibo, et al. A study on the short-range forecasting method for strong sand storm taking satellite cloudness imagery data as the dominant factor[A]. In: Fang Zongyi, ed. *Studies on Sand-dust Storms in China*[C]. Beijing: Meteorology Press, 1997. 98-102. [江吉喜, 项续康, 王子厚, 等. 以卫星资料为主的强沙尘暴超短期预报方法初探[A]. 见: 方宗义编. *中国沙尘暴研究*[C]. 北京: 气象出版社, 1997. 98-102.]
- [46] Gao Qinxian, Li Lingjun, Zhang Yungang, et al. Studies on the springtime dust storm of China[J]. *China Environmental Science*, 2000 20(6): 495-500. [高庆先, 李令军, 张运刚, 等. 我国春季沙尘暴研究[J]. *中国环境科学* 2000 20(6): 495-500.]
- [47] Fraser R S. Optical thickness of atmospheric dust over Tadzhikistan[J]. *Atmospheric Environment*, 1993 27A: 533-538.
- [48] Zhao Fengsheng, Xu Qingshan. Determination of aerosol optical thickness from multi-channel radiometer on board satellite[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1998 15(2): 149-154. [赵凤生, 徐青山. 利用星载多波长辐射计观测资料反演大气气溶胶光学厚度[J]. *量子电子学报* 1998 15(2): 149-154.]
- [49] Mao Jieai, Liu Li, Zhang Junhua. GMS5 remote sensing of aerosol optical thickness over Chaohu Lake[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2001 59(3): 353-359. [毛节泰, 刘莉, 张军华. GMS5

- 卫星遥感气溶胶光学厚度的试验研究[J]. 气象学报, 2001, 59(3): 353-359.]
- [50] Qiu Jinhong, Yang Jinhai. Optically remote sensing of the dust storm and result analysis[J]. Scientia Atmospherica Srica, 1994, 18(1): 1-10. [邱金恒 杨金辉. 沙尘暴的光学遥感及分析[J]. 大气科学, 1994, 18(1): 1-10.]
- [51] Zhang Zengxiang, Zhou Quanbin, Liu Bin, et al. Monitoring of the characters and ground-surface of dust storm area in north China using remote sensing[J]. Journal of Remote Sensing, 2001, 5(5): 377-382. [张增祥 周全斌 刘斌, 等. 中国北方沙尘灾害特点及其下垫面状况的遥感监测[J]. 遥感学报, 2001, 5(5): 377-382.]
- [52] Zhang Guoping, Zhang Zengxiang, Zhao Xiaoli, et al. Remote sensing study on the dust storm striking north China in 2000[J]. Journal of Remote Sensing, 2001, 5(6): 466-471. [张国平 张增祥 赵晓丽, 等. 2000年华北沙尘天气遥感监测[J]. 遥感学报, 2001, 5(6): 466-471.]
- [53] Gu Wei, Cai Xuesong, Xie Feng, et al. Study on relationship between vegetation cover and distribution of days of sand storm — Taking central and western Inner Mongolia for example[J]. Advance in Earth Sciences, 2002, 17(2): 273-277. [顾卫 蔡雪鹏 谢峰, 等. 植被覆盖与沙尘暴日数分布关系的探讨——以内蒙古中西部地区为例[J]. 地球科学进展, 2002, 17(2): 273-277.]

ADVANCES IN STUDYING DUST STORM USING REMOTE SENSING

FAN Yi-da¹, SHI Pei-jun¹, LUO Jing-ning²

(1. Institute of Resource, Beijing Normal University, Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education of China, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
2. National Satellite Meteorological Center, China Meteorology Bureau, Beijing 100081, China)

Abstract Researching dust storm is very important for ecological environment construction and sustainable development in the north of China. In the past ten years, the dust storm weather in the north of China has shown an upward trend, and researchers in relating subjects began studying dust storm from different sides. This article summarizes the development of studying dust storm by remote sensing in the world. Firstly, this paper gives a brief review of the history and actuality about researching dust storm in the world, then, it systemically introduces the data resources, characteristics, theories and technologies about researching dust storm with remote sensing. Among which, we lay emphasis on the technologies of researching dust storm with remote sensing. Finally, aiming at the shortage of actual research, this paper conceives the development trend of studying dust storm using remote sensing in future: Using multi-sources image data is the major trend in the dust storm research and establishing quantitative remote sensing model of information extraction is also important; It is necessary to do some ground experiments in the proper area to improve the precise of calculation of dust storm optics thickness, sandy quantity and intensity; It is also very important to extract some parameters (such as land use, moist of soil, composition and structure of vegetation) of ground data along dust storm path by remote sensing. In addition, based on GIS, it is urgent to establish the spatial database about Gobi, desert, desertification land and potential densification land, and combining the climatic factors (temperature, precipitation and wind) and topography conditions relating dust storm to develop quantitative model to analysis the relationship between ground surface factor and the intensity of dust storm.

Key words Dust storm; Remote sensing; Monitor method.